

**This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- **BLACK BORDERS**
- **TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- **FADED TEXT**
- **ILLEGIBLE TEXT**
- **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- **COLORED PHOTOS**
- **BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS**
- **GRAY SCALE DOCUMENTS**

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

THIS PAGE BLANK (USPTO)

⑤1

Int. Cl. 2:

Serial 110009/743,375
G 01 R 00
G 01 R 33-12

①9 BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES



PATENTAMT

DT 24 31 505 B1

①1

Auslegeschrift 24 31 505

②1

Aktenzeichen: P 24 31 505.7-35

②2

Anmeldetag: 1. 7. 74

④3

Offenlegungstag: —

④4

Bekannmachungstag: 17. 4. 75

③0

Unionspriorität:

③2 ③3 ③1 —

⑤4

Bezeichnung:

Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen, kontaktlosen Prüfung eines langgestreckten, wenigstens teilweise aus Supraleitermaterial bestehenden Leiters

⑦1

Anmelder:

Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München

⑦2

Erfinder:

Voigt, Hans, Dr., 8520 Erlangen; Rupp, Günther, Dr., 8500 Nürnberg

⑤6

Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:
Nichts ermittelt

DT 24 31 505 B1

Patentansprüche:

1. Verfahren zur kontinuierlichen, kontaktlosen Prüfung eines langgestreckten, wenigstens teilweise aus Supraleitermaterial bestehenden Leiters, dadurch gekennzeichnet, daß der Leiter mit im supraleitenden Zustand befindlichen Supraleitermaterial durch ein im Supraleitermaterial Abschirmströme induzierendes äußeres Magnetfeld bewegt und das durch diese Abschirmströme erzeugte Magnetfeld gemessen wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Leiter ein zeitlich konstantes äußeres Magnetfeld durchläuft.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Leiter ein zeitlich veränderliches äußeres Magnetfeld durchläuft.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die auf den Leiter wirkende Änderung des äußeren Magnetfeldes so groß gemacht wird, daß die induzierten Abschirmströme im gesamten Querschnitt des Supraleitermaterials die kritische Stromdichte erreichen.

5. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 4, gekennzeichnet durch einen Kryostaten (14), eine im Kryostaten (14) angeordnete zylinderförmige Supraleitungsmagnetspule (16) zum Erzeugen des äußeren Magnetfeldes (2), Mittel zum Einführen des Leiters (1; 12) in das Magnetfeld der Supraleitungsmagnetspule (16) etwa parallel zur Spulenachse, zum Umlenken des Leiters (1; 12) senkrecht zur Spulenachse und damit zum äußeren Magnetfeld (2) und zum Wiederausführen des Leiters (1; 12) etwa parallel zur Spulenachse und wenigstens eine in der Nähe der Umlenkstelle vorgesehene Magnetfeldsonde (19; 5).

6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß in der Nähe der Umlenkstelle oberhalb und unterhalb des Leiters (1; 12) je eine Magnetfeldsonde vorgesehen ist.

7. Vorrichtung nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß zum Erzeugen eines zusätzlichen zeitlich veränderlichen, senkrecht zum Leiter (1; 12) gerichteten äußeren Magnetfeldes eine zusätzliche Spule (23) an der Umlenkstelle vorgesehen ist.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetfeldsonde (5; 19) eine Hallsonde ist.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur kontinuierlichen, kontaktlosen Prüfung eines langgestreckten, wenigstens teilweise aus Supraleitermaterial bestehenden Leiters sowie eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens.

Beim Bau supraleitender Spulen, beispielsweise von Magnetspulen zur Erzeugung starker Magnetfelder oder von supraleitenden Wicklungen für elektrische Maschinen, ist die Beantwortung der Frage schwierig, ob der verwendete Leiter, in der Regel ein aus Supraleitermaterial und elektrisch normal-

leitendem Metall bestehender, draht-, band-, kabel- oder litzenförmiger Leiter, auf seiner gesamten Länge die zu stellenden Forderungen insbesondere hinsichtlich seiner kritischen Stromstärke und deren Magnetfeldabhängigkeit sowie auch anderer elektrischer und magnetischer Größen erfüllt. Bisher wurden üblicherweise von den Enden der einzelnen gefertigten Leiterlängen Teilstücke abgenommen, mit Stromzuführungen und Spannungssonden versehen und in einem äußeren Magnetfeld geprüft. Inwieweit solche Prüfungsergebnisse jedoch repräsentativ für die ganze Leiterlänge sind, blieb stets eine offene Frage. Selbst wenn man zusätzlich aus den einzelnen gefertigten Leiterlängen weitere Stichproben herausschneidet, müssen auch die daran gewonnenen Meßwerte nicht für die gesamte Leiterlänge repräsentativ sein. Außerdem hat ein solches Verfahren die unerwünschte Zerlegung einer Leiterlänge in kleinere Teilstücke zur Folge. Die kontinuierliche Prüfung der jeweils interessierenden Leitereigenschaften über die gesamte Leiterlänge und das Auffinden von äußerlich nicht sichtbaren Fehlstellen, die beispielsweise eine geringere kritische Stromstärke haben als die restlichen Leiterteile, war bisher nicht möglich. Andererseits erreichen gerade supraleitende Magnetspulen häufig nicht die Betriebswerte, die auf Grund der an den Leiterendstücken bzw. an sonstigen Stichproben gewonnenen Meßwerte zu erwarten sind. Man hat daher bisher supraleitende Spulen meist verhältnismäßig stark überdimensioniert. Ähnliche Probleme treten beispielsweise auch bei langen supraleitenden Drähten oder Bändern auf, die in supraleitenden Kabeln Verwendung finden sollen.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine kontinuierliche, kontaktlose Prüfung beliebiger Längen eines wenigstens teilweise aus Supraleitermaterial bestehenden Leiters zu ermöglichen, bevor der Leiter beispielsweise zu einer Spule gewickelt wird.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß der Leiter mit im supraleitenden Zustand befindlichem Supraleitermaterial durch ein im Supraleitermaterial Abschirmströme induzierendes äußeres Magnetfeld bewegt und das durch diese Abschirmströme erzeugte Magnetfeld gemessen wird.

Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt unter anderem die Bestimmung der Ortsabhängigkeit des kritischen Stromes, d. h. desjenigen Stromes, den das Supraleitermaterial gerade noch tragen kann, ohne in den normalleitenden Zustand überzugehen, entlang des Leiters. Dieser kritische Strom ist nämlich dem durch die Abschirmströme erzeugten Magnetfeld proportional. Insbesondere können durch das erfindungsgemäße Verfahren fehlerhafte Stellen, wie Brüche oder Schädigungen, durch zu starke Leiterverbiegungen festgestellt werden, die eine örtliche Herabsetzung des kritischen Stromes zur Folge haben. Weiterhin lassen sich mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens auch Aussagen über das Stabilitätsverhalten des Leiters, d. h. über seine Anfälligkeit gegen magnetische Flußsprünge, machen. Das erfindungsgemäße Verfahren läßt sich an sich bei allen langgestreckten, wenigstens teilweise aus Supraleitermaterial bestehenden Leitern anwenden. Besonders geeignet ist es jedoch, wegen der dort besonders günstigen geometrischen Verhältnisse, zur Prüfung bandförmiger Leiter.

Das Verfahren eignet sich sowohl zur Prüfung von Leitern, die beispielsweise durchgehende Schichten

aus Supraleitermaterial aufweisen, als auch zur Prüfung von sogenannten Vielkernleitern, bei denen eine Vielzahl von faden- bzw. drahtförmigen Supraleiterkernen in eine normalleitende Matrix eingelagert sind.

Besonders einfach läßt sich das erfindungsgemäße Verfahren durchführen, wenn der zu prüfende Leiter ein zeitlich konstantes äußeres Magnetfeld durchläuft. Das Verfahren kann aber auch so durchgeführt werden, daß der Leiter ein zeitlich veränderliches äußeres Magnetfeld durchläuft. Diese Ausführungsform des Verfahrens hat den Vorteil, daß die zeitliche Magnetfeldänderung, die der Leiter erfährt, auch bei konstanter Durchlaufgeschwindigkeit des Leiters durch das Magnetfeld, variiert werden kann. Die Feldänderungsgeschwindigkeit und die Durchlaufgeschwindigkeit des Leiters durch das äußere Magnetfeld sind dadurch entkoppelt. Eine solche Variation der zeitlichen Feldänderung kann beispielsweise dann von Interesse sein, wenn untersucht werden soll, bis zu welcher Feldänderungsfrequenz der zu untersuchende Leiter stabil ist. Die Stabilität des Leiters zeigt sich dann dadurch, daß das durch die Abschirmströme erzeugte Magnetfeld unabhängig von der Änderungsfrequenz des äußeren Magnetfeldes ist. Ferner können durch eine Feldänderung unabhängig von der Durchlaufgeschwindigkeit des Leiters durch das äußere Magnetfeld beispielsweise auch Aufschlüsse über die infolge der Feldänderung in der normalleitenden Matrix eines Vielkernleiters auftretenden Ströme gewonnen werden.

Besonders günstig ist es, wenn die auf den Leiter wirkende Änderung des äußeren Magnetfeldes so groß gemacht wird, daß die induzierten Abschirmströme im gesamten Querschnitt des Supraleitermaterials die kritische Stromdichte erreichen. Dies gilt insbesondere dann, wenn der kritische Strom des Leiters oder die räumliche Verteilung des kritischen Stromes entlang des Leiters, d. h. die Homogenität des kritischen Stromes, gemessen werden sollen. Wird die kritische Stromdichte nämlich nicht im gesamten Querschnitt des Supraleitermaterials erreicht, so könnten sich Inhomogenitäten in der räumlichen Verteilung des kritischen Stromes entlang des Leiters unter Umständen nur sehr schwach oder überhaupt nicht bemerkbar machen.

Als besonders vorteilhaft zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens hat sich eine Vorrichtung erwiesen, die einen Kryostaten, eine im Kryostaten angeordnete zylinderförmige Supraleitungsmagnetspule zum Erzeugen des äußeren Magnetfeldes, ferner Mittel zum Einführen des Leiters in das Magnetfeld der Supraleitungsmagnetspule etwa parallel zur Spulenachse, zum Umlenken des Leiters senkrecht zur Spulenachse und damit zum äußeren Magnetfeld und schließlich zum Wiederausführen des Leiters aus dem Magnetfeld parallel zur Spulenachse aufweist und bei der ferner wenigstens eine Magnetfeldsonde in der Nähe der Umlenkstelle vorgesehen ist. Besonders günstig ist es, wenn in der Nähe der Umlenkstelle oberhalb und unterhalb des Leiters je eine Magnetfeldsonde vorgesehen ist. Durch Addition der Meßsignale beider Sonden können dann Meßfehler in einfacher Weise kompensiert werden, die durch Abstandsänderungen zwischen Leiter und Meßsonden während der Messung hervorgerufen werden. Zum Erzeugen eines zusätzlichen zeitlich veränderlichen, senkrecht zum Leiter gerichteten

äußeren Magnetfeldes kann eine zusätzliche Spule an der Umlenkstelle vorgesehen sein. Als Magnetfeldsonden sind insbesondere Hallsonden geeignet. Es kommen aber auch andere Magnetfeldsonden, beispielsweise magnetfeldabhängige Widerstände, sogenannte Feldplatten, sowie auch kleine Induktionsspulen und geeignete supraleitende Sonden (SQUID) in Frage.

An Hand einiger Figuren und Beispiele soll die Erfindung noch näher erläutert werden.

Fig. 1 zeigt schematisch das Meßprinzip;

Fig. 2 zeigt schematisch eine für das erfindungsgemäße Verfahren bevorzugte Vorrichtung;

Fig. 3 zeigt ein Detail der Vorrichtung nach Fig. 2;

Fig. 4 zeigt mit dem erfindungsgemäßen Verfahren gewonnene Meßwerte.

Wie Fig. 1 zeigt, wird beim erfindungsgemäßen Verfahren ein wenigstens teilweise aus Supraleitermaterial bestehender, insbesondere bandförmiger Leiter 1 im supraleitfähigen Zustand einem durch die Pfeile 2 dargestellten äußeren Magnetfeld ausgesetzt, das bei einem bandförmigen Leiter vorzugsweise senkrecht auf der Breitseite des Bandes steht. Beim Bewegen des Leiters 1 durch das äußere Magnetfeld 2 werden im Supraleitermaterial des Leiters 1 Abschirmströme 3 induziert, die wiederum ein Magnetfeld 4 erzeugen. Oberhalb bzw. unterhalb der Bandebene des Leiters 1 läßt sich dieses Magnetfeld 4 der Abschirmströme als Schwächung des äußeren Magnetfeldes 2 mittels einer Magnetfeldsonde 5, beispielsweise einer Hallsonde, messen. Um das Magnetfeld 4 unmittelbar zu messen, kann man das an den Hallelektroden 6 der Hallsonde 5 abzunehmende Meßsignal vorteilhaft so kompensieren, daß das Ausgangssignal gerade Null ist, wenn sich im äußeren Magnetfeld 2 kein Leiter 1 befindet. Das beim Einführen eines Leiters 1 in das äußere Magnetfeld 2 auftretende Meßsignal ist dann dem Abschirmmagnetfeld 4 proportional. Da ferner im Supraleitermaterial des Leiters 1, wenn dieser eine hinreichend große Änderung des äußeren Magnetfeldes 2 erfahren hat, stets der kritische Strom fließt, ist das magnetische Abschirmfeld 4 wiederum dem kritischen Strom des Leiters 1 proportional. Der kritische Strom I_c läßt sich bei homogener Stromverteilung über den Querschnitt des Leiters 1 durch folgende Beziehung aus der kompensierten Hallspannung U_H ermitteln:

$$I_c = \frac{U_H \cdot F}{x_H \cdot B_y}$$

ist dabei die Empfindlichkeit der Hallsonde, F der Querschnitt des Supraleitermaterials des Leiters und B_y die auf der Bandebene senkrecht stehende Komponente des Abschirmfeldes geteilt durch die Stromdichte.

Bei nicht homogener Stromverteilung über den Supraleiterquerschnitt, aber gleicher lokaler Stromdichte wie bei der homogenen Stromverteilung ist das Abschirmfeld 4 kleiner und von der Stromverteilung abhängig. Der jeweilige Proportionalitätsfaktor zwischen kritischem Strom und dem Abschirmmagnetfeld läßt sich aber berechnen oder durch Vergleichsmessungen ermitteln.

Die erreichbaren Abschirmmagnetfelder sind hinreichend groß, um gut gemessen werden zu können. Bei einem etwa 2 mm breiten und etwa 70 μ m star-

ken Leiter, der an seiner Oberfläche mit einem etwa 9 μm starken supraleitenden Nb_3Sn -Überzug versehen ist und in einem äußeren Magnetfeld mit einer magnetischen Induktion von 2 Tesla eine kritische Stromdichte von etwa 10^6 A/cm^2 trägt, wird bei einem Hallsondenabstand von der Bandoberfläche von etwa 0,7 mm ein Abschirmfeld von etwa 0,03 Tesla gemessen. Das Abschirmfeld beträgt in diesem Fall etwa 1,5% des äußeren Magnetfeldes. Wenn man eine Hallsonde mit einer Breite von etwa 0,4 mm verwendet, ist das Abschirmfeld über die Sondenbreite auch hinreichend homogen, um eine zuverlässige Messung zu erlauben. Ein Abstand der Hallsonde von etwa 0,7 mm von der Bandoberfläche des Leiters 1 hat sich als günstig erwiesen, weil in einem solchen Abstand von der Bandoberfläche das Abschirmfeld 4 einerseits noch hinreichend groß für eine Messung, andererseits aber nicht mehr so stark mit dem Abstand von der Bandoberfläche veränderlich ist wie in unmittelbarer Nähe der Bandoberfläche. Bei einem Abstand von 0,7 mm ist daher die Messung gegenüber kleinen Abstandsänderungen während der Messung bereits verhältnismäßig unempfindlich. Wie bereits erwähnt, kann man, um Abstandsänderungen noch weitergehend zu kompensieren, vorteilhaft in etwa gleichem Abstand unterhalb der Bandoberseite des Leiters 1 eine weitere Hallsonde vorsehen und die Meßsignale beider Hallsonden addieren. Da bei dieser Anordnung bei Lageänderungen des bandförmigen Leiters 1 jeweils nur eine Hallsonde ein höheres Abschirmfeld mißt, während die andere Hallsonde in einen Bereich des Abschirmfeldes mit kleinerer Feldstärke gelangt, ist das Summensignal weitgehend von Lageänderungen des Leiters 1 unabhängig.

Eine für das erfindungsgemäße Verfahren bevorzugte Vorrichtung, bei der das an Hand von Fig. 1 erläuterte Meßprinzip ausgenutzt wird, ist schematisch in Fig. 2 und teilweise in genaueren Einzelheiten in Fig. 3 dargestellt. Von einer Vorratsrolle 11 läuft der zu untersuchende bandförmige Leiter 12 über eine Führungsrolle 13 beispielsweise über eine Polytetrafluoräthyldurchführung in einen Kryostaten 14, der einen Vorrat 15 von flüssigem Helium enthält. Im flüssigen Helium ist eine zylinderförmige Supraleitungsmagnetspule 16 angeordnet, die das auf den Leiter 12 wirkende äußere Magnetfeld erzeugt. Das von der Spule 16 erzeugte Magnetfeld kann beispielsweise innerhalb der Bohrung 17 der Spule bis zu 5 Tesla betragen. Der Leiter 12 wird zunächst in das Heliumbad 15 eingeführt und bis zur Supraleitfähigkeit abgekühlt. Anschließend wird er in die Bohrung 17 der Supraleitungsmagnetspule 16 eingeführt, wobei er zunächst etwa in Richtung der Spulenachse parallel zum äußeren Magnetfeld verläuft. Im Bereich der höchsten Feldstärke des äußeren Magnetfeldes wird der Leiter 12 dann, wie Fig. 3 genauer zeigt, durch eine Rolle 18 mit einem Durchmesser von beispielsweise etwa 40 mm so umgelenkt, daß am tiefsten Punkt der Umlenkrolle das von der Supraleitungsmagnetspule 16 erzeugte äußere Magnetfeld senkrecht auf der Bandoberfläche des Leiters 12 steht. Betrachtet man die zur Bandoberfläche des Leiters 12 senkrechte Magnetfeldkomponente, so erkennt man, daß der bandförmige Leiter 12 auf einem Viertel des Umfanges der Rolle 18 eine Änderung des äußeren Magnetfeldes etwa vom Wert Null bis zur maximalen Feldstärke erfährt. Infolge dieser

Feldstärkeänderung werden in dem Teil des Leiters 12, der sich im Bereich der Umlenkstelle befindet, die Abschirmströme induziert.

An der Innenseite der Rolle 18 ist eine Hallsonde 19 angebracht. Nach der Umlenkung über die Rolle 18 wird der Leiter 12 wieder in einer zur Achse der Spule 16 etwa parallelen Richtung zunächst aus dem Magnetfeld der Spule 16 und dann aus dem Kryostaten 14 herausgeführt und über eine Führungsrolle 20 auf eine Rolle 21 aufgewickelt. Der Leitertransport kann vorteilhaft durch motorgetriebene Reibräder 22 erfolgen, welche den bandförmigen Leiter 12 durch die Vorrichtung ziehen. Eine Bandgeschwindigkeit von etwa 100 m/h hat sich dabei als praktikabel erwiesen. In Fig. 3 ist ferner noch eine kleine magnetische Doppelspule 23 dargestellt, die lokal begrenzte Feldänderungen oder ein zusätzliches, zeitlich veränderliches Magnetfeld erzeugen kann, wobei das erzeugte Magnetfeld ebenfalls senkrecht auf der Bandoberfläche des Leiters 12 steht.

Die Meßsignale der Hallsonde 19 werden, wie Fig. 2 schematisch zeigt, einem Kompensator 24 zugeführt, an dessen Ausgang beispielsweise ein Blattschreiber 25 zur Aufzeichnung der kompensierten Meßsignale angeschlossen ist.

Zwei mittels eines solchen Blattschreibers aufgezeichnete Schreiberdiagramme sind in Fig. 4 dargestellt. Die Diagramme sind, da das zur Aufzeichnung dienende Papier jeweils von links nach rechts durch den Schreiber läuft, von rechts nach links niedergeschrieben. Der Blattschreiber schreibt auf das laufende Papierband abhängig von der Zeit der jeweiligen Messung die jeweils gemessene kompensierte Hallspannung nieder. In Fig. 4 sind die Aufzeichnungszeit und die kompensierte Hallspannung zur Auswertung der Diagramme bereits in andere Größen umgerechnet. An der Abszisse ist der Abstand L der jeweils untersuchten Leiterstelle vom Anfang des untersuchten Leiters angegeben. Dieser Abstand läßt sich aus Aufzeichnungszeit und Durchlaufgeschwindigkeit des Leiters ohne weiteres ermitteln. An der Ordinate ist der kritische Strom des Leiters aufgetragen, für den, wie bereits erläutert, die kompensierte Hallspannung ein Maß ist.

Die Struktur der aufgezeichneten Kurven kommt durch eine Reihe von Effekten zustande, die im folgenden an Beispiel eines Leiterbandes mit einem Überzug aus einer supraleitenden Nb_3Sn -Schicht näher erläutert werden sollen:

Zunächst kann die Oberflächenschicht des Bandes bewirken, daß die Entfernung zwischen Band und Hallsonde schwankt. Damit diese Abstandsänderungen nur zu einer relativ kleinen Hallspannungsänderung führen, empfiehlt es sich, den Abstand groß zu wählen, obwohl die Meßempfindlichkeit dadurch verringert wird. Bei einer Anordnung, wie sie in den Fig. 2 und 3 dargestellt ist, führt eine Abstandsänderung von 0,01 mm zu einer Hallspannungsänderung von etwa 1,8%.

Ferner können Mikrodefekte, die zu einer Querschnittsverringering des Supraleiters führen, und Inhomogenitäten in der Zusammensetzung der supraleitenden Schicht vorhanden sein und zu Schwankungen im kritischen Strom führen. Diese Schwankungen treten im Schreiberdiagramm bei mehrmaligem Durchlauf stets an der gleichen Stelle auf. Bei Variation des Magnetfeldes sollten sie relativ zum Mittelwert feldunabhängig sein, wenn sie durch

Querschnittsänderungen hervorgerufen werden. Inhomogenitäten sollten dagegen magnetfeldabhängige Hallspannungsänderungen erzeugen, weil der kritische Strom dieser Stellen eine andere Magnetfeldabhängigkeit als der des homogenen Supraleitermaterials zeigt. Im allgemeinen werden die durch Inhomogenitäten verursachten Hallspannungsschwankungen mit dem Feld zunehmen, da solche Stellen meist niedrige kritische Felder besitzen.

Thermische Instabilitäten infolge der hohen Feldänderungsgeschwindigkeit beim Durchführen des zu untersuchenden Bandes durch das äußere Magnetfeld können sich durch Flußsprünge äußern. An den Bandstellen, an denen der magnetische Fluß teilweise oder ganz eingedrungen ist, ändert sich die Hallspannung. Dieser Vorgang sollte weitgehend statistischer Natur sein. Im einzelnen wird bei Flußsprüngen die Hallspannung um so stärker verringert, je später der vom Flußsprung betroffene Teil des Leiters wieder den vollen kritischen Strom führt. Wegen der abnehmenden Magnetisierung des Supraleitermaterials bei zunehmendem äußeren Magnetfeld nimmt die Anfälligkeit gegen Flußsprünge mit steigendem Magnetfeld ab. Außerdem müßten die Schwankungen der Hallspannung um so geringer werden, je besser die Stabilität des untersuchten Leiter ist.

Aus der Regelmäßigkeit und der Magnetfeldabhängigkeit der Hallspannungsschwankungen lassen sich somit Schlüsse auf deren Ursache ziehen. Da die Einflüsse der Oberflächenrauigkeiten des Leiters durch geeignete Abstandswahl zwischen Leiter und Hallsonde weitestgehend unterdrückt werden können, verbleiben im wesentlichen die durch Mikrodefekte und Inhomogenitäten einerseits sowie Flußsprünge andererseits hervorgerufenen Hallspannungsschwankungen.

Die durch Mikrodefekte und Inhomogenitäten verursachten Schwankungen können leicht isoliert werden, da sie bei mehrfachem Durchlauf des untersuchten Leiters durch die Prüfvorrichtung immer wieder an der gleichen Leiterstelle auftreten müssen.

Die durch thermische Instabilitäten hervorgerufenen Schwankungen lassen sich dagegen nur statistisch auswerten. Der kritische Strom I_c wird dabei, wie in Fig. 4 angedeutet ist, durch den Ausschlag bis zum Schwerpunkt des Schreiberdiagramms festgelegt. ΔI gibt die Schwankungen des Ausschlags um den Schwerpunkt an und erfaßt damit die auftretenden Instabilitäten. Als Maß für den Grad der Instabilität dient der Quotient $\Delta I/I_c$. Bei einem vollkommen stabilen Band ist $\Delta I = 0$. Mit zunehmender Instabilität nimmt auch $\Delta I/I_c$ zu.

Die im folgenden Ausführungsbeispiel erläuterten Messungen zeigen ferner, daß der Quotient $\Delta I/I_c$ auch auf Grund seiner Abhängigkeit von verschiedenen Stabilisierungsmaßnahmen und vom äußeren Magnetfeld als geeignetes Maß für die Stabilität bzw. Instabilität eines Leiters angesehen werden kann.

Zur Vorbereitung der Messung wurden einige Supraleiterbänder hergestellt, von denen man erwarten konnte, daß sie sich unterschiedlich stabil verhalten. Ein etwa 70 μm dickes Band mit einem etwa 9 μm dicken, durch Abscheidung aus der Gasphase hergestellten Nb_3Sn -Überzug an der Oberfläche und ein etwa 80 μm dickes Band mit einem etwa 14 μm dicken, ebenfalls durch Abscheidung aus der Gasphase hergestellten Nb_3Sn -Überzug an der Oberfläche — beide Bänder etwa 2 mm breit — wurden in je

drei etwa 40 cm lange Stücke geschnitten und anschließend galvanisch mit einem Silberüberzug versehen. Je ein Stück jedes Bandes erhielt einen Silberüberzug mit einer Dicke von etwa 6 μm , je ein weiteres Stück einen Überzug mit einer Dicke von etwa 20 μm und das jeweils dritte Stück schließlich einen Überzug mit einer Dicke von etwa 40 μm . Die einzelnen Bandstücke wurden dann aneinandergelötet und durch die Prüfvorrichtung gezogen und mehrfach in einem konstanten äußeren Magnetfeld vermessen, wobei die magnetische Induktion der angewandten Magnetfelder zwischen 2 und 5 Tesla lag.

Die Meßergebnisse in einem Magnetfeld von 4 Tesla sind in Kurve A von Fig. 4 als Beispiel für die bei diesen Messungen gewonnenen Schreiberdiagramme dargestellt.

Anschließend wurden auf beide Breitseiten aller Bandstücke, mit Ausnahme des letzten Bandstücks, das einen 14 μm dicken Nb_3Sn -Überzug und eine 40 μm starke Silberschicht aufwies, je ein 50 μm dickes Kupferband aufgelötet. Danach wurde der bandförmige Leiter erneut in jeweils konstanten äußeren Magnetfeldern von 2 bis 5 Tesla vermessen. Die hierbei in einem Magnetfeld von 4 Tesla gewonnenen Ergebnisse sind in Kurve B von Fig. 4 dargestellt.

In den in Fig. 4 dargestellten Diagrammen sind die zu den einzelnen Bandstücken gehörenden Diagrammteile mit den aus der folgenden Tabelle zu entnehmenden Buchstaben bezeichnet:

Dicke der Nb_3Sn -Schicht (μm)	9			14		
Dicke der Silber-schicht (μm)	6	20	40	6	20	40
Ohne Kupferbänder	a	b	c	d	e	f
Mit Kupferbändern	\bar{a}	\bar{b}	\bar{c}	\bar{d}	\bar{e}	—

Einen ähnlichen Verlauf wie die in einem äußeren Magnetfeld von 4 Tesla gemessenen Diagramme zeigten auch die in anderen äußeren Magnetfeldern gemessenen Diagramme.

Sowohl in Kurve A als auch in Kurve B von Fig. 4 sind zwischen den zu den einzelnen Bandstücken gehörenden Kurventeilen an besonders großen Ausschlägen deutlich die fast normalleitenden Lötstellen zu erkennen, durch welche die Bandstücke miteinander verbunden waren. An diesen Lötstellen, die sich ähnlich wie Unterbrechungen der supraleitenden Schicht innerhalb eines zusammenhängenden Leiterstücks auswirken, ist der kritische Strom besonders niedrig.

Wie die Kurven A und B ferner zeigen, kann jedem Bandstück ein kritischer Strom I_c zugeordnet werden, der durch den Schreiberausschlag bis zum Schwerpunkt der aufgezeichneten Kurve definiert ist. Die Schwankungen des Ausschlags um den Schwerpunkt werden durch ΔI beschrieben. Bei einigen Bandstücken traten nach dem Auflöten der Kupferbänder bei verschiedenen, nacheinander erfolgenden Messungen reproduzierbar an den gleichen Bandstellen nadelförmige Ausschläge auf (vgl. z. B. Bandstück \bar{c}). Solche Ausschläge wurden bei der Ermittlung von ΔI nicht erfaßt, weil sie nicht auf Instabilitäten, sondern entweder auf Beschädigungen der Nb_3Sn -Schicht

oder auf eine ungenügende Verbindung zwischen der Supraleiterschicht und dem Kupferband zurückzuführen sind.

Wie Fig. 4 und auch die Messungen in äußeren Magnetfeldern anderer Größe zeigen, haben die verschiedenen Stabilisierungsmaßnahmen sowohl einen Einfluß auf den kritischen Strom I_c als auch einen Einfluß auf den Grad der Stabilität, d. h., auf $\Delta I/I_c \cdot I_c$ nimmt mit die Dicke des aufgetragenen Silberüberzuges zu und wird durch die aufgelöteten Kupferbänder noch weiter erhöht. Der Quotient $\Delta I/I_c$ nimmt mit zunehmender Dicke der Silberschicht ab. Eine weitere Abnahme von $\Delta I/I_c$, also eine weitere Erhöhung der Stabilität, erreicht man durch das Auflöten der Kupferbänder. Aus der Reihe fallen lediglich die Bandstücke c und \bar{c} , deren abweichende Werte, wie weitere Untersuchungen zeigten, auf einen schlechten Kontakt zwischen der Nb₃Sn-Schicht und der Silberschicht zurückzuführen sind. Mit zunehmendem äußeren Magnetfeld nehmen I_c und $\Delta I/I_c$ erwartungsgemäß ab, d. h., der kritische Strom wird kleiner, während die Stabilität zunimmt. Die Durchlaufgeschwindigkeit der Bänder durch die Prüfvorrichtung bei den Messungen betrug zunächst 1 m/min, was bei einem Magnetfeld von 2 Tesla eine Feldänderungsgeschwindigkeit von 64 Tesla/min und bei einem Magnetfeld von 5 Tesla einer Feldänderungsgeschwindigkeit von 159 Tesla/min entspricht. Änderungen der Durchlaufgeschwindigkeit der Bänder und damit der Feldänderungsgeschwindigkeit um die Faktoren 0,25 bis 2,5 hatten bei den vorstehend beschriebenen Messungen keinen Einfluß auf Meßergebnisse.

Kontrollmessungen durch mehrfache Vermessungen des gleichen Bandes und Vergleiche mit konventionellen Messungen an kurzen Bandstücken zeigten, daß durch das erfindungsgemäße Meßverfahren keine Beeinträchtigung der Qualität der vermessenen Bänder stattfindet.

Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich somit hervorragend zur Messung der Größe und der Ortsabhängigkeit des kritischen Stromes und Stabilität insbesondere bei bandförmigen Supraleitern. In gleicher Weise wie im vorstehend geschilderten Ausführungsbeispiel können auch die entsprechenden Größen von Vielkernleitern kontaktlos und kontinuierlich ermittelt werden. Bei Vielkernleitern lassen sich außerdem mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens die in der normalleitenden Matrix durch das äußere Magnetfeld induzierten Querströme und der Einfluß der Verdrillung der Supraleiterkerne auf

diese Querströme ermitteln, indem man beispielsweise Messungen an Leitern mit unterschiedlichen Verdrillungslängen miteinander vergleicht.

Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt außer den bereits erläuterten Beispielen noch eine Reihe weiterer Variationsmöglichkeiten. Beispielsweise kann das äußere Magnetfeld, das der Leiter durchläuft, während des Durchlaufs des Leiters zeitlich monoton verändert, also beispielsweise von einem zunächst niedrigen Wert kontinuierlich auf einen höheren Wert angehoben werden. Man kann dann beispielsweise die Abhängigkeit des kritischen Stromes des Leiters vom äußeren Magnetfeld mit einem einzigen Leiterdurchlauf messen. Natürlich gibt eine derartige Messung keinen sicheren Aufschluß über die Homogenität des kritischen Stromes entlang des Leiters. Gleichzeitig kann man die Homogenität des kritischen Stromes und die Abhängigkeit des kritischen Stromes vom äußeren Magnetfeld beispielsweise dann messen, wenn man den Leiter nacheinander Magnetfelder unterschiedlicher Größe durchlaufen läßt und die jeweils induzierten Abschirmströme über mehrere Magnetfeldsonden mißt oder wenn man den Leiter entlang des Leiterweges beispielsweise zunehmendes Magnetfeld durchlaufen läßt und entlang des Leiters eine Reihe von Sonden zur Messung der jeweils induzierten Abschirmfelder anordnet.

Ferner kann man beispielsweise das äußere Magnetfeld zeitlich periodisch verändern und das durch die Abschirmströme erzeugte Magnetfeld unter Verwendung eines phasenempfindlichen, von der zeitlichen Veränderung des äußeren Magnetfeldes gesteuerten Verstärkers messen. Einmal kann durch eine solche Maßnahme die Empfindlichkeit des Meßverfahrens durch Unterdrückung von Rauschen noch weiter erhöht werden. Zum anderen können auch induzierte Ströme voneinander getrennt werden, die sich mit unterschiedlichen Zeitkonstanten ändern. Als solche Ströme kommen beispielsweise die Abschirmströme im Supraleitermaterial einerseits und die einen ohmschen Widerstand erfahrenden Ströme im normalleitenden Material des Leiters andererseits, insbesondere also Querströme in der Matrix von Vielkernleitern, in Frage.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann auch bereits während der Herstellung des zu prüfenden Leiters eingesetzt und insbesondere zwischen einzelnen Schritten des Herstellungsprozesses angewandt werden. Die gewonnenen Meßwerte können dann zur Steuerung oder Regelung des Herstellungsprozesses ausgenutzt werden.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

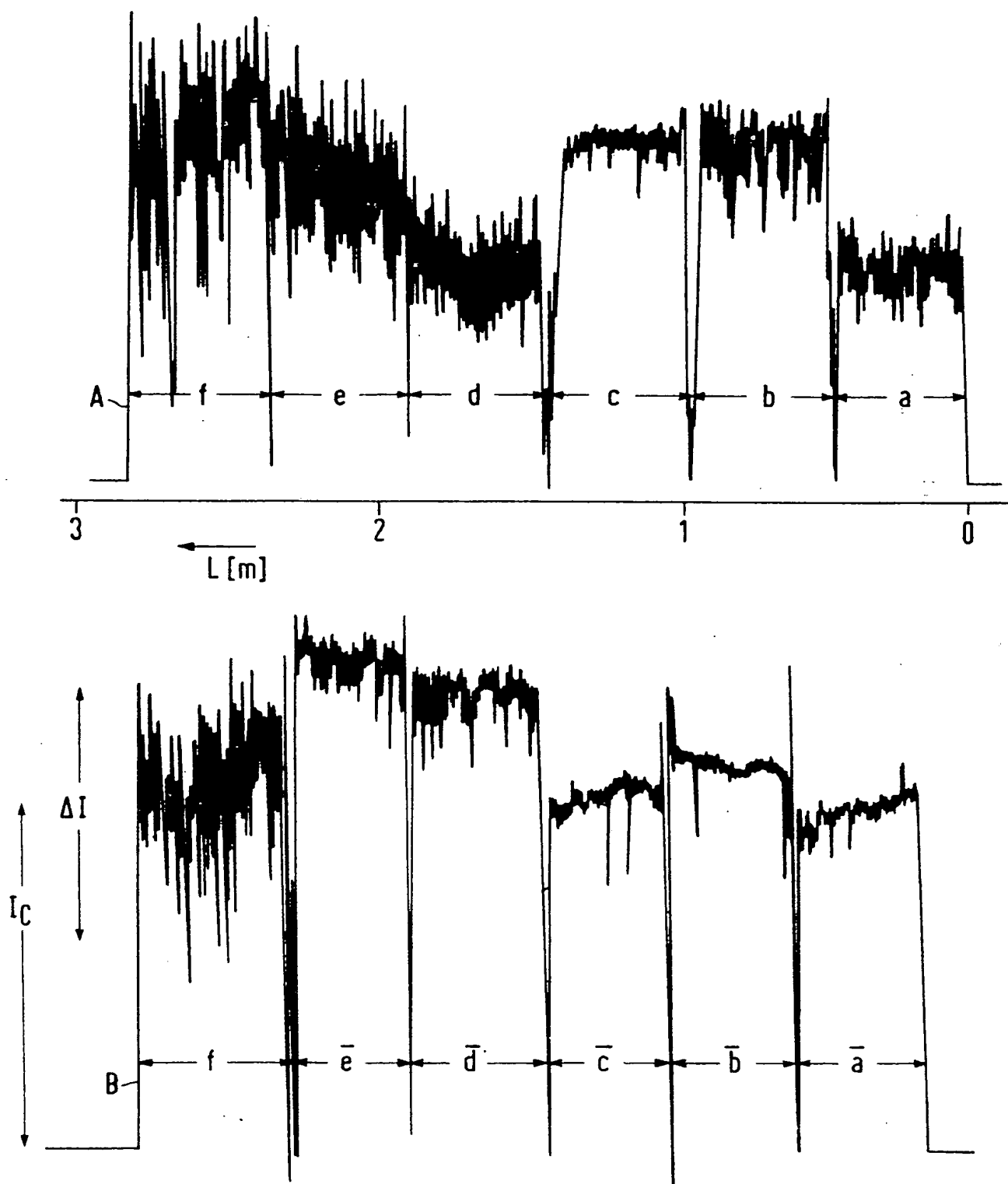


Fig.4

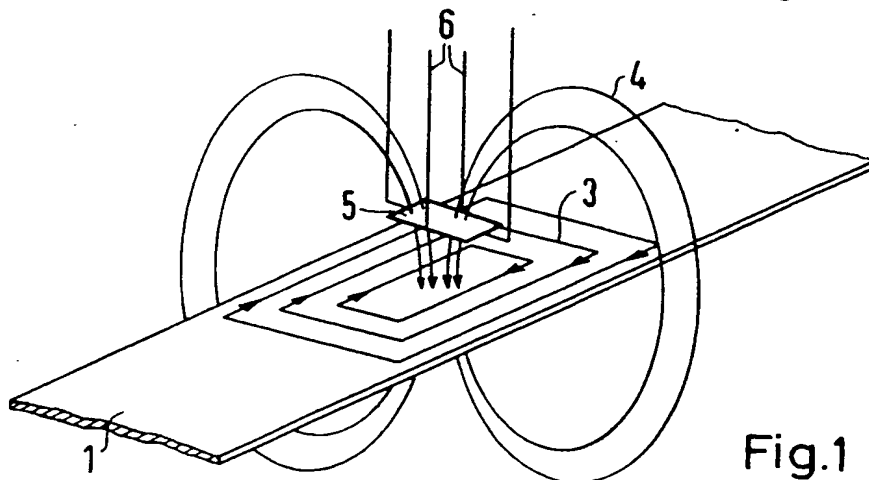


Fig. 1

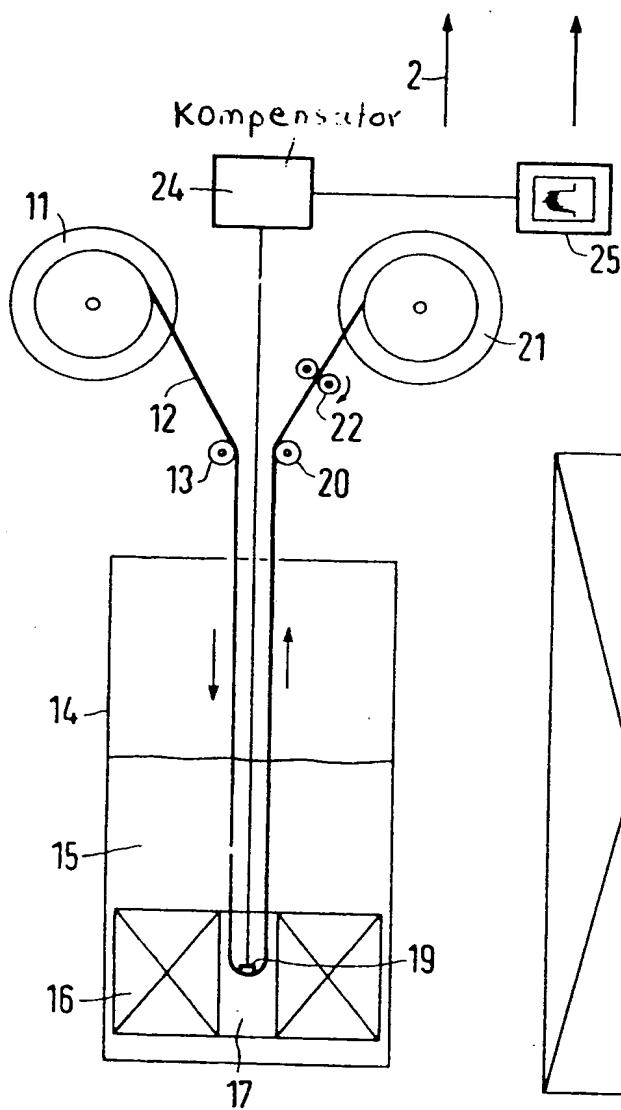


Fig. 2

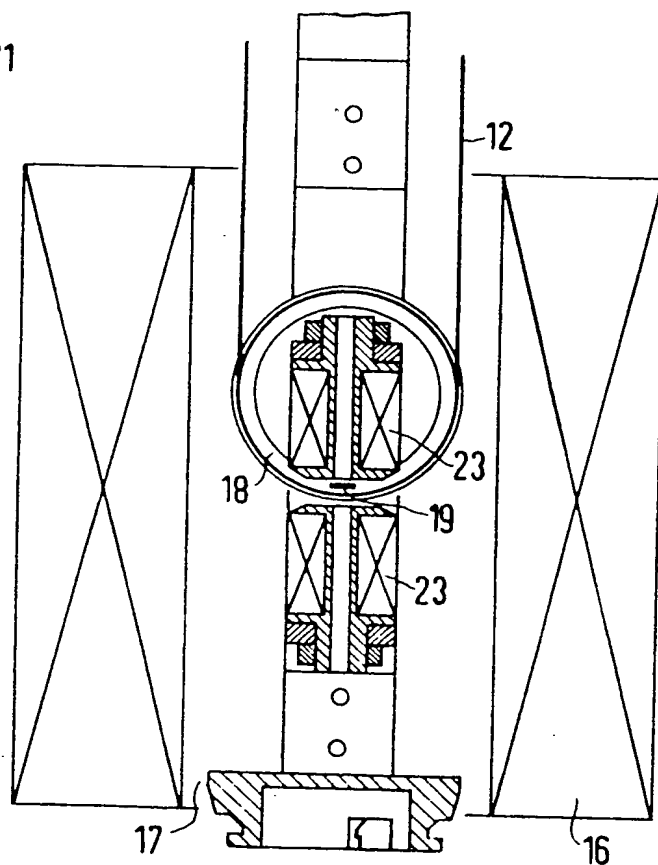


Fig. 3

⑤

Int. Cl. 2:

G 01 R 31/00

⑯

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

G 01 R 33/12

DEUTSCHES**PATENTAMT****DT 26 06 504 A 1**

⑪

Offenlegungsschrift 26 06 504

⑫

Aktenzeichen:

P 26 06 504.3-35

⑭

Anmeldetag:

18. 2. 76

⑬

Offenlegungstag:

25. 8. 77

⑳

Unionspriorität:

⑳ ㉑ ㉒

⑤④

Bezeichnung:

Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen, kontaktlosen Prüfung eines langgestreckten, wenigstens teilweise aus Supraleitermaterial bestehenden Leiters

⑥①

Zusatz zu:

P 24 31 505.7

⑦①

Anmelder:

Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München

⑦②

Erfinder:

Rupp, Günter, Dipl.-Phys. Dr., 8500 Nürnberg

Prüfungsantrag gem. § 28b PatG ist gestellt

DT 26 06 504 A 1

Patentansprüche

1. Verfahren zur kontinuierlichen, kontaktlosen Prüfung eines langgestreckten, wenigstens teilweise aus Supraleitermaterial bestehenden Leiters, wobei der Leiter mit im supraleitenden Zustand befindlichem Supraleitermaterial durch ein im Supraleitermaterial Abschirmströme induzierendes äußeres Magnetfeld bewegt und das durch diese Abschirmströme erzeugte Magnetfeld gemessen wird, nach Patent 24 31 505, dadurch gekennzeichnet, daß der Leiter (30) durch ein äußeres Magnetfeld hindurchgeführt wird, das mindestens zwei räumlich voneinander getrennte, in Leiterlängsrichtung hintereinander angeordnete Magnetfeldbereiche (39, 40) umfaßt, deren Felder (41 bzw. 42) in ihrer Richtung bezüglich der Leiterlängsachse um einen vorgegebenen Winkel in Umfangsrichtung gegeneinander verdreht sind (Fig. 3).
2. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch Mittel zum Umlenken der Führungsrichtung des Leiters (30) innerhalb eines Kryostaten und durch mindestens zwei im Umlenkbereich angeordnete Magnetspulen (56 bis 58) mit etwa senkrecht zur Leiterachse verlaufenden Spulenachsen zum Erzeugen der beiden Magnetfeldbereiche (39, 40) sowie durch jeweils zwei Magnetfeldsonden (49, 50 bzw. 51) in jedem der Magnetfeldbereiche (39, 40) zu beiden Seiten des Leiters (30) in Feldrichtung (Fig. 4).
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Magnetfeldbereiche (39, 40) mit jeweils zwei Magnetspulen (56, 57 bzw. 58) zu beiden Seiten des Leiters (30) vorgesehen sind, und daß die Spulenachsen des ersten Magnetspulenpaares (56, 57) gegenüber dem zweiten Magnetspulenpaar (58) in Leiterumfangsrichtung um etwa 90° verdreht sind.

VPA 75 E 7575

2606504

- 2.
- ~~30~~ -

4. Vorrichtung nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet,
daß Magnetfeldbereiche (39, 40) mit verschiedener Flußdichte
vorgesehen sind.

VPA 75 E 7575

709834/0484

2606504

SIEMENS AKTIENGESellschaft
Berlin und München

Unser Zeichen
VPA 76 F 7503 BKD

3.

Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen, kontaktlosen
Prüfung eines langgestreckten, wenigstens teilweise aus Supra-
leitermaterial bestehenden Leiters

Zusatz zum Patent 24 31 505 (VPA 74/7552)

Gegenstand des Hauptpatentes ist ein Verfahren zur kontinuierlichen, kontaktlosen Prüfung eines langgestreckten, wenigstens teilweise aus Supraleitermaterial bestehenden Leiters. Der Leiter wird mit im supraleitenden Zustand befindlichem Supraleitermaterial durch ein äußeres Magnetfeld bewegt, das im Supraleitermaterial Abschirmströme induziert. Das durch diese Abschirmströme erzeugte Magnetfeld wird gemessen. Die entsprechende Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens enthält einen Kryostaten, in dem eine zylinderförmige Supraleitungsmagnetspule zum Erzeugen des äußeren Magnetfeldes angeordnet ist. Ferner sind in dem Kryostaten Mittel zum Einführen des Leiters in das Magnetfeld der Supraleitungsmagnetspule etwa parallel zur Spulenachse, zum Umlenken des Leiters senkrecht zur Spulenachse und damit zum äußeren Magnetfeld und zum Wiederausführen des Leiters etwa parallel zur Spulenachse sowie wenigstens eine in der Nähe der Umlenkstelle angeordnete Magnetfeldsonde vorgesehen.

Dem bekannten Verfahren und der entsprechenden Vorrichtung liegt das Meßprinzip zugrunde, den Leiter im supraleitenden Zustand durch ein Magnetfeld hindurchzuziehen, so daß supraleitende Abschirmströme induziert werden, und dann das Eigenfeld dieser Ströme zu messen. Da Störungen im Supraleiter seine Abschirmströme und damit deren Eigenfelder außerhalb des Supraleiter-

VPA 75 E 7575

Slm 21 Hag / 6. 2. 1976

709834/0484

- R - 4.

materials beeinträchtigen, können mittels Magnetfeldmeßsonden die damit verbundenen Feldänderungen gemessen und den entsprechenden Leiterstellen zugeordnet werden.

Das bekannte Verfahren und die entsprechende Vorrichtung sind besonders gut für bandförmige Supraleiter geeignet. Sollen damit jedoch langgestreckte Leiter, deren supraleitende Schicht verhältnismäßig stark dreidimensional ausgedehnt, beispielsweise zylinderförmig, ist, auf Defektfreiheit mit diesem bekannten Verfahren und der Vorrichtung geprüft werden, so können Oberflächenbereiche vorhanden sein, in denen Defekte nicht mit Sicherheit registriert werden.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es deshalb, das bekannte Verfahren und die bekannte Vorrichtung dahingehend zu verbessern, daß bei Supraleitern mit beliebigem Querschnitt Störungen in allen Supraleitungsbereichen mit Sicherheit festgestellt werden können.

Für das eingangs genannte Verfahren besteht die Lösung dieser Aufgabe darin, daß der Leiter durch ein äußeres Magnetfeld bewegt wird, das mindestens zwei räumlich voneinander getrennte, in Leiterlängsrichtung hintereinander angeordnete Magnetfeldbereiche umfaßt, deren Felder in ihrer Richtung bezüglich der Leiterlängsachse um einen vorgegebenen Winkel in Umfangsrichtung gegeneinander verdreht sind.

Bei der Prüfung eines langgestreckten Leiters, dessen supraleitende Schicht verhältnismäßig stark dreidimensional ausgedehnt ist, erhält man so in jedem Magnetfeldbereich aufgrund von Messung der mit Defekten in der supraleitenden Schicht verbundenen Feldänderungen eine Aussage über die Defektfreiheit eines Teils der supraleitenden Schicht. Die Vorteile des Verfahrens nach der Erfindung bestehen insbesondere darin, daß mehrere Magnetfeldbereiche vorgesehen sind, deren Felder sich untereinander so ausrichten lassen, daß die Informationen aus allen Magnetfeldbereichen Aussagen über die Defektfreiheit der gesamten supraleitenden Schicht liefern.

- 8 - 5.

- Zur Durchführung des Verfahrens nach der Erfindung ist eine Vorrichtung besonders geeignet, die Mittel zum Umlenken der Führungsrichtung des Leiters innerhalb eines Kryostaten enthält und die im Umlenkbereich mit mindestens zwei Magnetspulen mit etwa
- 5 senkrecht zur Leiterachse verlaufenden Spulenachsen zum Erzeugen der beiden Magnetfeldbereiche versehen ist und die in jedem der Magnetfeldbereiche jeweils zwei Magnetfeldsonden enthält, die zu beiden Seiten des Leiters in Feldrichtung liegen. Für Leiter mit kreisförmigem Querschnitt ist es insbesondere vorteilhaft,
- 10 zwei Magnetfeldbereiche mit jeweils zwei Magnetspulen zu beiden Seiten des Leiters vorzusehen, wobei die Spulenachsen des ersten Magnetspulenpaares gegenüber dem zweiten Magnetspulenpaar in Leiterumfangsrichtung um etwa 90° gedreht sind.
- 15 Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird auf die schematische Zeichnung verwiesen, in deren Fig. 1 Teile der aus der deutschen Patentschrift 24 31 505 bekannten Meßvorrichtung angedeutet sind. In Fig. 2 ist in einem Diagramm die Ortsabhängigkeit des Defektsignals dieser Vorrichtung wiedergegeben. Fig. 3 zeigt eine Meß-
- 20 vorrichtung nach der Erfindung. In Fig. 4 ist ein Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung gemäß Fig. 3 angedeutet, von der in Fig. 5 in einem Diagramm ein Meßprotokoll wiedergegeben ist.

- In Fig. 1 ist in einem Querschnitt eine Meßvorrichtung gemäß der
- 25 deutschen Patentschrift 24 31 505 teilweise veranschaulicht. Ein zu prüfender Leiter 30 enthält einen normalleitenden Kern 31, der von einer supraleitenden Schicht 32 umgeben ist. Als Kern des Leiters kann beispielsweise ein Aluminiumdraht mit kreisförmigem Querschnitt vorgesehen sein, auf dessen Außenseite eine
- 30 Niob-Schicht aufgebracht ist. Das supraleitende Material braucht jedoch nicht unbedingt als dünne Außenschicht einen normalleitenden Kern zu umschließen. Es kann auch über einen Teil des Leiterquerschnitts oder über den gesamten Leiterquerschnitt verteilt sein.

35

Der Leiter 30 soll sich im supraleitfähigen Zustand befinden und durch ein äußeres Magnetfeld bewegt werden. Dieses Magnetfeld ist

- 4 - 6.

durch einzelne Feldvektoren 34 veranschaulicht, die im wesentlichen senkrecht zu einer Ebene, in der die Leiterachse liegt, gerichtet sind. Aufgrund der im allgemeinen verhältnismäßig großen dreidimensionalen Ausdehnung der supraleitenden Schicht 32 des Leiters 30 in Richtung der Feldvektoren 34 ist es zweckmäßig, zwei Hallsonden 36 und 37 vorzusehen. Diese beiden Hallsonden sind in Feldrichtung und bezüglich des Leiters diametral zueinander nahe der Oberfläche des Leiters angeordnet. Die an ihnen hervorgerufenen Hallspannungen werden zweckmäßig addiert.

Zu einer Abschätzung der Wirkung von Defektstellen auf das hervorgerufene Meßsignal können folgende vereinfachende Annahmen gemacht werden. Wie in der Figur dargestellt ist, soll ein Teil der Leiterschicht 32 des Leiters 30 von der Größe $\Delta \alpha$ unter einem Winkel α zur Richtung der Feldvektoren 34 gelegen sein und keinen Strom tragen können. Die damit verbundene Änderung des Hallsonden-signals ist im Diagramm der Fig. 2 dargestellt. Den berechneten Kurven dieses Diagramms sind ein Aluminiumdraht mit 2 mm Durchmesser sowie verschiedene Hallsondenabstände z von der Drahtoberfläche zugrundegelegt. Mit b_z ist die Summe der Eigenfelder des ungestörten Leiters am Ort der beiden Hallsonden, mit $\tilde{b}_z(\alpha)$

die Summe der fehlenden Eigenfelder des Leiterbereichs $\Delta \alpha$ unter dem Winkel α ebenfalls am Ort der beiden Hallsonden bezeichnet. Im Diagramm der Figur ist nun der Bruchteil des Eigenfeldes, der durch die defekte Strombahn fehlt, relativ zum Bruchteil der fehlenden Supraleiterschicht als Funktion des Winkels α veranschaulicht. Der Ordinatenwert 1 bedeutet dabei, daß das Eigenfeld sowie die supraleitende Schicht um den gleichen Bruchteil reduziert sind. Werte größer bzw. kleiner als 1 bedeuten eine stärkere bzw. schwächere relative Eigenfeldänderung im Vergleich zur Änderung der supraleitenden Schicht. Wie aus dem Diagramm der Figur zu ersehen ist, kann ein Defekt bei einem Winkel α ungefähr 90° sehr gut registriert werden, während ein entsprechender Defekt bei einem Winkel $\alpha = 0$ oder 180° praktisch keine Signaländerung hervorruft.

VPA 75 E 7575

- 8 - 7.

Aus diesem Grunde und wie in Fig. 3 schematisch angedeutet ist, umfaßt das Magnetfeld gemäß der Erfindung, das der Leiter 30 durchlaufen muß, zwei in Leiterlängsrichtung versetzt angeordnete Magnetfeldbereiche 39 und 40. Die mit 41 bezeichneten Feldvektoren des Magnetfeldbereiches 39 sind dabei gegenüber den entsprechenden Feldvektoren 42 des Magnetfeldbereiches 40 um etwa 90° in Umfangsrichtung des Leiters verdreht. Es können so die in einer supraleitenden Schicht 32 auftretenden Defekte, das sind vor allem Risse in Achsrichtung von beispielsweise einigen Zentimetern Länge, deutlich zu Signalveränderungen an den Hallsonden führen, obwohl der mit 44 gemäß Fig. 1 bezeichnete Bereich in diesen Fällen sehr klein sein kann.

Beim Bewegen des Leiters 30 durch die Magnetfeldbereiche 39 und 40 werden in seiner supraleitenden Schicht 32 Abschirmströme induziert, die durch Linien 43 bzw. 44 angedeutet sind. Das mit diesen Abschirmströmen jeweils verbundene und durch einzelne Feldvektoren 46 bzw. 47 angedeutete Magnetfeld überlagert sich so mit den Magnetfeldern 41 bzw. 42. Die damit verbundenen Magnetfeldänderungen können gemäß Fig. 1 jeweils mit zwei Hallsonden gemessen werden, von denen in der Figur die dem Magnetfeldbereich 39 zugeordneten Hallsonden mit 49 und 50 und die dem Magnetfeldbereich 40 zugeordneten Hallsonden mit 51 und 52 bezeichnet sind.

In Fig. 4 ist ein Längsschnitt durch einen Teil einer Meßvorrichtung gemäß der Erfindung dargestellt. Der zu untersuchende, bis zur Supraleitfähigkeit abgekühlte Leiter 30 wird in einem in der Figur nicht dargestellten, beispielsweise mit flüssigem Helium gefüllten Kryostaten eingeführt und mittels einer Umlenkvorrichtung 54, beispielsweise einer halbkreisförmig gebogenen Schiene, in Gegenrichtung aus dem Kryostaten wieder herausgeführt. Auf dem Weg entlang der Umlenkschiene 54 durchläuft der Leiter zwei Magnetfeldbereiche 39 und 40 gemäß Fig. 3. Die Magnetfelder dieser Magnetfeldbereiche werden nach Fig. 4 beispielsweise von jeweils zwei zu beiden Seiten des Leiters angeordneten Magnetfeldspulen erzeugt, die normal- oder supraleitende Elektromagnete oder auch Permanentmagnete sein können. Die beiden dem Magnetfeldbereich

reich 39 zugeordneten Magnetspulen 56 und 57 sind in der Figur als Längsschnitt veranschaulicht. Von den dem Magnetfeldbereich 40 zugeordneten Magnetspulen ist in der Figur nur eine Magnetspule im Querschnitt ersichtlich. Diese Spule, die mit 58 bezeichnet ist, verdeckt gerade die ihr gegenüberliegende Magnetspule. Die beiden Magnetspulen dieses Magnetfeldbereiches 40 entsprechen beispielsweise in ihren geometrischen Abmessungen den beiden Magnetspulen 56 und 57. Dabei ist das von den Magnetspulen 56 und 57 hervorgerufene Magnetfeld etwa senkrecht zu der Leiterachse und etwa radial bezüglich der halbkreisförmigen Umlenkvorrichtung 54 gerichtet. Die beiden Magnetspulen des Magnetfeldbereichs 40 sind gegenüber den Magnetspulen 56 und 57 in Umfangsrichtung des Leiters etwa um 90° gedreht, so daß das von ihnen hervorgerufene Magnetfeld senkrecht zur Leiterachse und etwa parallel zu einer Achse 60 verläuft, die der halbkreisförmigen Umlenkvorrichtung 54 zugeordnet werden kann. Zwischen den Magnetspulenpaaren der beiden Magnetfeldbereiche 39 und 40 sind jeweils zu beiden Seiten des Leiters 30 in Richtung der erzeugten Magnetfelder zwei Hallsonden angeordnet. Bei der in der Figur gewählten Darstellung sind die beiden den Magnetspulen 56 und 57 zugeordneten Hallsonden 49 und 50 zu sehen, während die der Magnetspule 58 zugeordnete Hallsonde 57 gerade die ihr auf der anderen Leiterseite gegenüberliegende Hallsonde verdeckt. Für einen Durchmesser des Leiters 30 von 2 mm wird zweckmäßig als Entfernung dieser Hallsonden von der Leiteroberfläche etwa 1 mm gewählt, während für einen 3 mm-Leiter zweckmäßig ein Abstand von 1,5 mm vorgesehen wird.

Die Hallspannungen der beiden Hallsonden jedes Magnetspulenpaares können zweckmäßig addiert und um die Hallspannung des angelegten Feldes kompensiert werden. Diese so kompensierten Hallspannungen U_H der beiden Magnetfeldbereiche 39 und 40 können nun auf einen Mehrfachsreiber gegeben werden. Es lassen sich somit die Meßsignale aus den beiden Magnetfeldbereichen unabhängig voneinander aufzeichnen.

35

Als Ausführungsbeispiel ist ein entsprechendes Schreiberprotokoll in Fig. 5 für einige Meter eines Leiters 30 mit einem Durchmesser von etwa 3 mm veranschaulicht. Als Leiter wurde ein Aluminiumdraht

- 7 - 9.

mit einer äußeren Niobschicht verwendet. Die Niobschicht des Leiterstücks wurde durch Feilen an einigen definierten Stellen so geschädigt, daß der darunterliegende Aluminiumkern sichtbar wurde. Danach wurde dieser geschädigte drahtförmige Leiter in einer Vorrichtung gemäß Fig. 4 durch zwei Magnetfeldbereiche 39 und 40 hindurchgezogen. In dem in der Figur dargestellten Schreiberprotokoll ist die sich an den Hallsonden ergebende Hallspannung U_H^{Def} als Funktion des Ortes x längs des Leiters wiedergegeben. Die Prozentzahlen an der Ordinate dienen als Maßstab und sind auf die Hallspannung U_H des unbeschädigten Leiters bezogen. Die untere Kurve gibt das Signal des ersten Magnetfeldbereiches 39, die obere das des zweiten Magnetfeldbereiches 40 wieder. Als externe magnetische Flußdichte der beiden entsprechenden Magnetspulenpaare wurden 0,24 Tesla gewählt. Der Abstand zwischen den beiden Magnetspulenpaaren betrug in Leiterlängsrichtung etwa 117 mm. Im linken Teil des Schreiberprotokolls nach Fig. 5 erkennt man die durch die absichtlich erzeugten Defekte hervorgerufenen und mit D bezeichneten Signale. In der Bildmitte der dem zweiten Magnetfeldbereich 40 zugeordneten oberen Kurve sind deutlich nadelförmige Signale zu verzeichnen, die bei der unteren Kurve nicht oder nur andeutungsweise vorhanden sind. Hierbei handelt es sich um sogenannte Flußsprünge, die durch Ummagnetisierungsprozesse beim Durchlaufen der beiden Magnetfeldbereiche zustandkommen. Es hat sich nun herausgestellt, daß diese Signale verschwinden, wenn das Magnetfeld des ersten Magnetfeldbereiches 39 etwas reduziert wird. Wird das Feld jedoch verstärkt, treten entsprechende Signale in dichter Folge hintereinander auf. Es kann deshalb zweckmäßig sein, die Magnetfeldstärken der beiden Magnetspulenpaare unterschiedlich zu wählen. Es läßt sich so erreichen, daß Flußsprünge weitgehend vermieden werden. Außerdem ergibt sich der Vorteil, daß die erste, dem Magnetfeldbereich 39 zugeordnete Meßvorrichtung relativ unempfindlich ist und vor allem gravierende Defekte registriert, während die dem zweiten Feldbereich 40 zugeordneten Meßsonden sehr empfindlich auch auf kleinste Defekte reagieren können.

Im Ausführungsbeispiel gemäß den vorstehenden Figuren ist zwar

- 8 - 10.

von einem Vollleiter mit kreisförmigem Querschnitt und supraleitender Oberfläche ausgegangen worden. Der Leiter kann jedoch auch rohrförmig als Hohlleiter ausgebildet sein oder eine andere geometrische Gestalt, beispielsweise einen elliptischen Querschnitt, haben. Ferner können auch mehr als zwei Magnetfeldbereiche, beispielsweise 3 Feldbereiche vorgesehen sein, deren Feldrichtungen bezüglich der Leiterachse etwa um 60° in Umfangsrichtung des Leiters gegeneinander verdreht sind.

4 Patentansprüche

5 Figuren

Nummer: 26 06 504
 Int. Cl. 2: G 01 R 31/00
 Anmeldetag: 18. Februar 1976
 Offenlegungstag: 25. August 1977

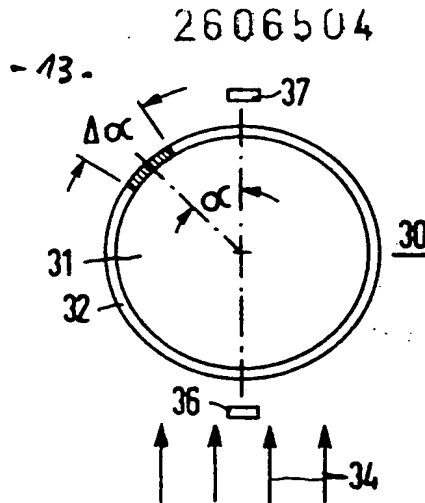


Fig. 1

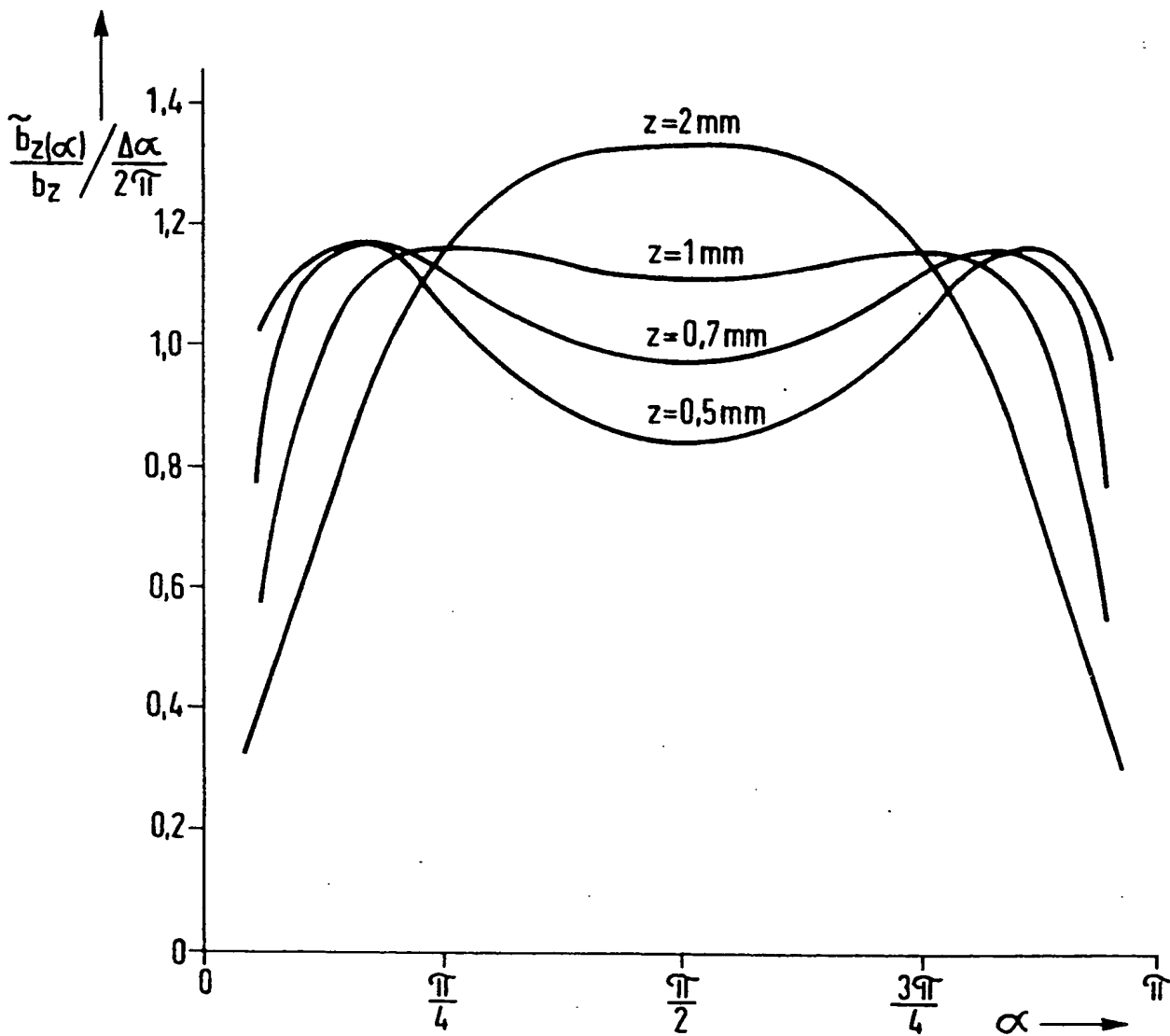


Fig. 2

709834/0484

2606504

. 111.

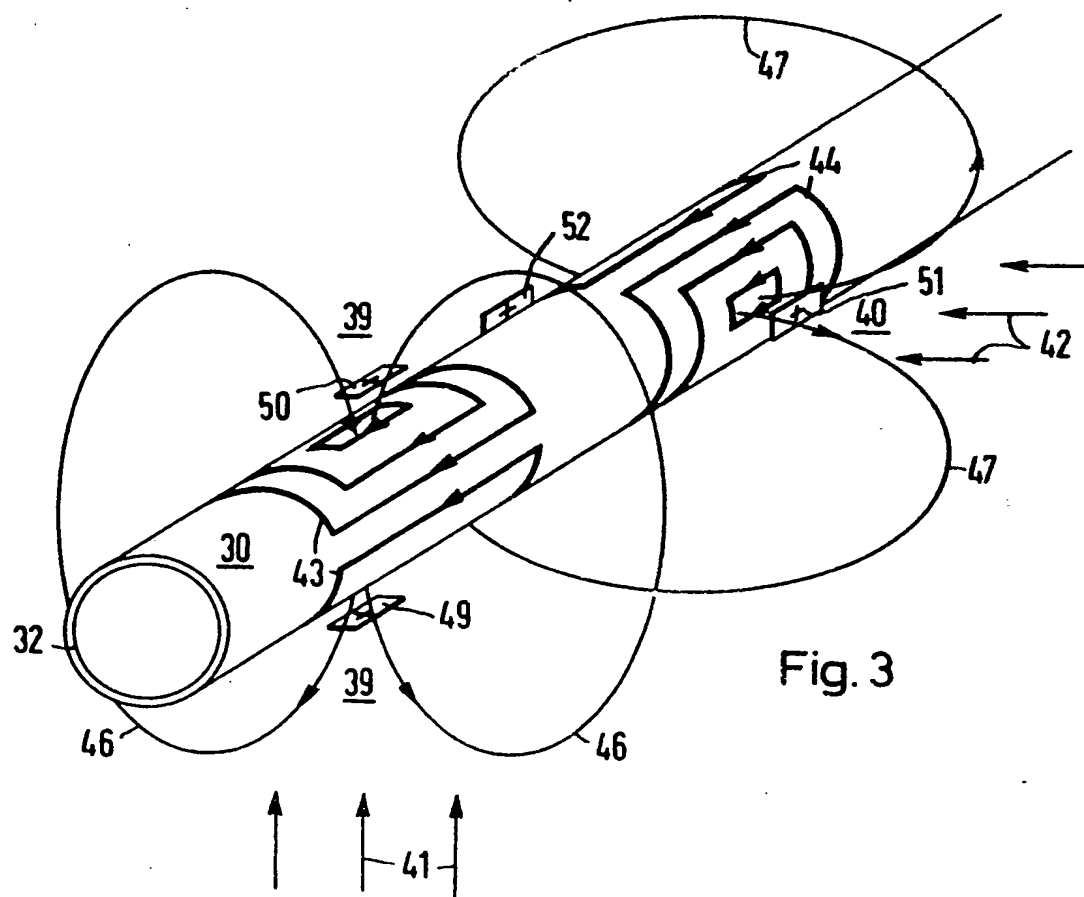


Fig. 3

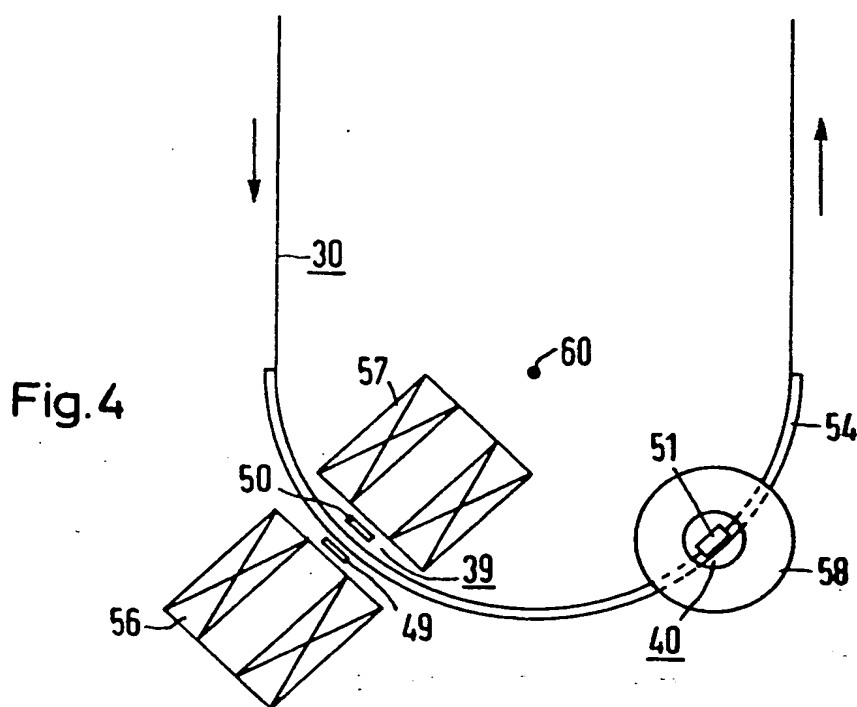


Fig. 4

709834/0484

2606504

. 12.

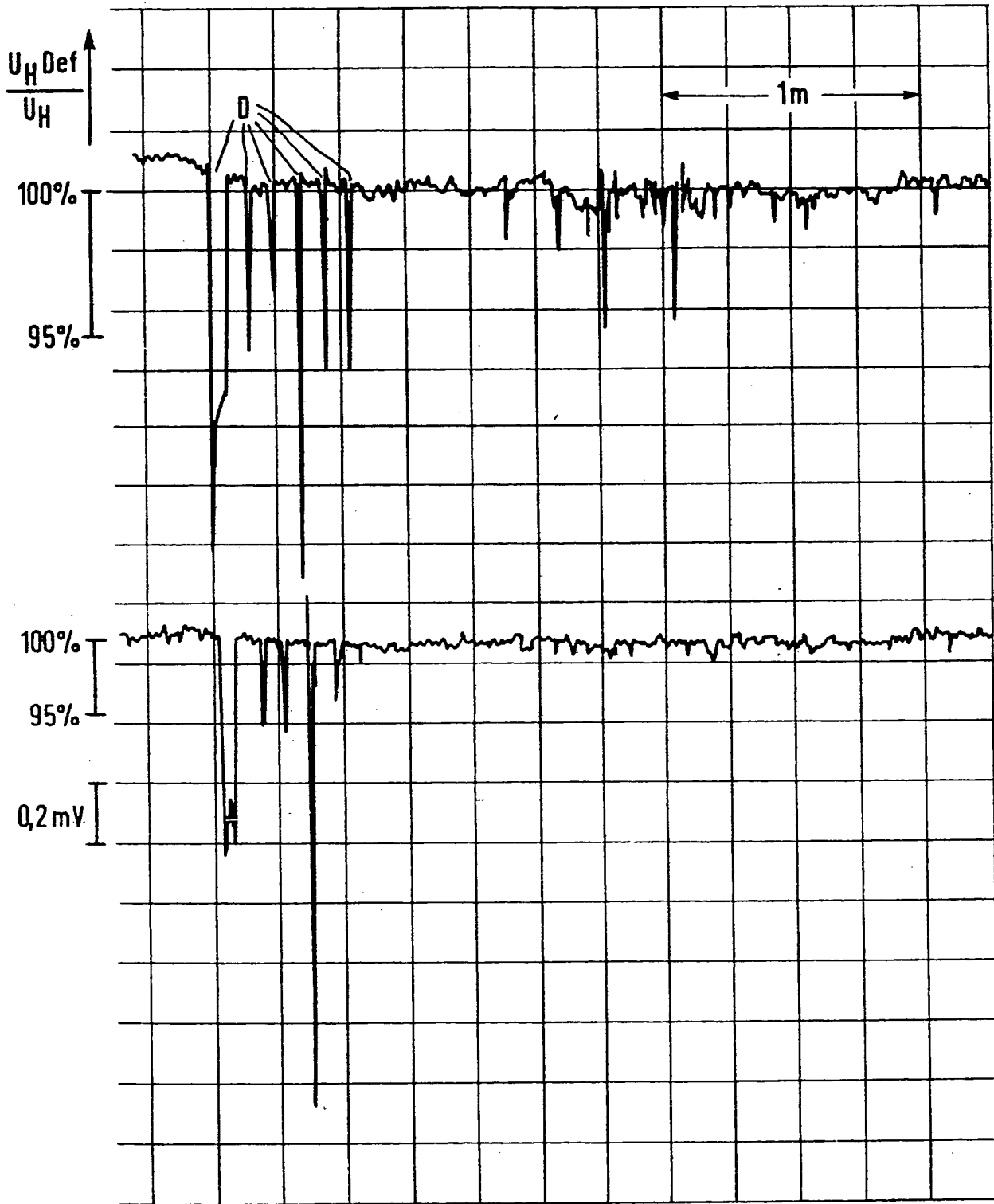


Fig. 5

709834/0484